

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 103 14 215.0

Anmeldetag: 28. März 2003

Anmelder/Inhaber: Siemens Aktiengesellschaft, München/DE

Bezeichnung: Magnetresonanzantenne

IPC: G 01 R 33/32

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 29. Oktober 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

A large, stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to the President of the German Patent and Trademark Office.

Schäfer

Beschreibung

Magnetresonanzantenne

5 Die Erfindung betrifft eine Magnetresonanzantenne, welche in einer Birdcage-Struktur angeordnete, parallel verlaufende Antennen-Längsstäbe und die Antennen-Längsstäbe endseitig hochfrequenzmäßig verbindende Antennen-Endringe sowie eine Mehrzahl von Hochfrequenz-Schaltelementen aufweist, um zumindest
10 einen Teil der Antennen-Längsstäbe zur Verstimmung der Eigenresonanzfrequenz der Antenne gegenüber einer Arbeits-Magnetresonanzfrequenz hochfrequenzmäßig zu unterbrechen.

Moderne Magnetresonanzanlagen arbeiten in der Regel mit mehreren verschiedenen Antennen (im Folgenden auch Spulen genannt) zum Aussenden von Hochfrequenzpulsen zur Kernresonanzanregung und/oder zum Empfang der induzierten Magnetresonanzsignale. Üblicherweise besitzt eine Magnetresonanzanlage eine größere, in der Regel fest im Gerät eingebaute sogenannte
15 Ganzkörperspule, auch Bodycoil (BC) genannt, sowie mehrere kleine Lokalspulen (LC), auch Oberflächenspulen genannt. Die Lokalspulen dienen im Gegensatz zu der Ganzkörperspule dazu, detaillierte Abbildungen von Körperteilen bzw. Organen eines Patienten aufzunehmen, die sich verhältnismäßig nah an der Körperoberfläche befinden. Zu diesem Zweck werden die Lo-
20 kalspulen direkt an der Stelle des Patienten appliziert, an der sich der zu untersuchende Bereich befindet. Bei einem Einsatz einer solchen Lokalspule wird in vielen Fällen mit der in der Magnetresonanzanlage fest eingebauten Ganzkörperspule (als Sendespule) gesendet und mit der Lokalspule (als Empfangsspule) werden die induzierten Magnetresonanzsignale empfangen. Damit die Spulen nicht miteinander wechselwirken, ist es notwendig, die Empfangsspule in der Sendephase und die Sendespule in der Empfangsphase zu verstimmen. Beim Verstimmen
25 wird die Eigenresonanzfrequenz der jeweiligen Antenne derart verstellt, dass sie nicht mehr im Bereich der Arbeits-Magnetresonanzfrequenz liegt. Eine auf diese Art verstimmte
30
35

Antenne verhält sich im Idealfall neutral, d. h. sie ist für die von der anderen Spule ausgesandten Hochfrequenzpulse bzw. für die induzierten Magnetresonanzsignale transparent. Sofern permanent zwischen zwei verschiedenen Antennen hin- und hergeschaltet wird, nennt man diese vorübergehende Verstimmung in der Sendephase bzw. der Empfangsphase eine „dynamische Verstimmung“. Darüber hinaus kann aber eine Spule auch dauerhaft verstimmt werden, sofern nur mit einer anderen Spule gearbeitet werden soll. Eine solche „statische Verstimmung“ ist insbesondere in den Fällen nötig, wenn eine sendefähige Lokalspule verwendet wird, die sowohl die Sende- als auch die Empfangsfunktion übernimmt. Da die in die Anlage fest eingebaute größere Ganzkörperspule während der bildgebenden Messung physikalisch nicht entfernt werden kann, wird sie durch die Verstimmung elektrisch deaktiviert.

Als Ganzkörperspule werden vielfach Magnetresonanzantennen verwendet, die eine sogenannte Birdcage-Struktur aufweisen. Eine solche Antenne weist eine Mehrzahl von auf einer zylinderartigen Oberfläche angeordneten, parallel laufenden Antennen-Längsstäben auf, die endseitig jeweils durch Antennen-Endringe hochfrequenzmäßig untereinander verbunden sind. Die Antennen-Längsstäbe und Antennen-Endringe können prinzipiell in beliebiger Form ausgebildet sein. In vielen Fällen handelt es sich um Leiterbahnen, welche auf einer flexiblen Leiterbahnfolie aufgebracht sind, die zylinderförmig um den Messraum, in dem sich das Untersuchungsobjekt während der Untersuchung befindet, gewickelt sind. Bei einer Ganzkörperspule verläuft die Birdcage-Struktur um den Patientenaufnahmeraum, in welchem der Patient während der Messung gelagert wird. Bei Lokalspulen in Form einer Birdcage-Struktur dient der Messraum zur Aufnahme des Kopfes oder anderer Extremitäten eines Patienten, um genau diesen Bereich zu untersuchen.

Zur Verstimmung solcher Magnetresonanzantennen mit einer Birdcage-Struktur gibt es prinzipiell verschiedene Möglichkeiten.

Sofern die Feldstärke des Grundmagnetfelds (im Folgenden auch B_0 -Feld genannt) der Magnetresonanzanlage unterhalb von zwei Tesla liegt, ist eine Verstimmung sehr gut über die Hochfrequenzspeiseleitung möglich. Dabei wird zum Verstimmen der Antenne mittels eines geeigneten Schaltelements, beispielsweise einer PIN-Diode oder eines Relais, ein Kurzschluss am spulenfernen Ende der Speiseleitung erzeugt. Dieser Kurzschluss wird über die Speiseleitung zum Speisepunkt, d. h. dem Anschlusspunkt, an dem die Speiseleitung an der Antenne angeschlossen ist, übertragen. Die dadurch erreichte Verstimmung reicht aus, um die Verkopplung mit der jeweils anderen aktiven Antenne zu unterdrücken. Der Vorteil einer solchen spulenfernen Verstimmung liegt darin, dass die Zuleitung des für die Schaltelemente notwendigen Gleichstroms kein Problem ist, da aufgrund der großen Entfernung keine Wechselwirkung des Schalt-Gleichstroms mit den hohen statischen und hochfrequenten Feldern in der unmittelbaren Umgebung der Antenne zu erwarten ist.

Bei höheren B_0 -Feldstärken hat sich die spulenferne Verstimmung jedoch nicht bewährt. In diesen Fällen ist es notwendig, die Verstimmeelemente unmittelbar in die Struktur der Antenne einzubauen. Bei der Verstimmung einer Antenne mit einer Birdcage-Struktur kann dies entweder dadurch geschehen, dass die Antennen-Endringe oder die Antennen-Längsstäbe oder beides verstimmt werden. Bei einer solchen Verstimmung wird im Allgemeinen mittels eines geeigneten Hochfrequenz-Schaltelements eine resonante Induktivität unterbrochen oder eine resonante Kapazität überbrückt, d. h. kurzgeschlossen. Als Hochfrequenz-Schaltelemente werden heutzutage in der Regel Schaltdioden, beispielsweise PIN-Dioden, verwendet, da diese in der Lage sind, hochfrequenzmäßig sowohl hohe Ströme als auch hohe Spannungen auszuhalten, und zudem mit der ausreichenden Geschwindigkeit geschaltet werden können.

Eine Endring-Verstimmung bei einer Birdcage-Struktur ist insofern vorteilhaft, weil von außen ein leichter Zugriff auf

die Verstimmlemente, d. h. die HF-Schaltelemente, möglich ist, so dass entsprechend problemlos die erforderlichen Gleichstromzuleitungen verlegt werden können. Aus hochfrequenzmäßiger Sicht ist eine solche Endring-Verstimmung in einer Birdcage-Struktur aber nicht die optimale Lösung. Aus der Praxis sind daher bereits Antennen mit Birdcage-Strukturen bekannt, bei denen die Hochfrequenz-Schaltelemente innerhalb der Längsstäbe - d. h. der Längsinduktivitäten - angeordnet sind, mit denen die betreffenden Längsstäbe unterbrochen werden können und somit die gesamte Stabstruktur verstimmt werden kann. Dabei wird jedes HF-Schaltelement von außen, d. h. von außerhalb der Birdcage-Struktur, individuell mit den notwendigen Gleichstromsignalen gespeist. Der große Nachteil hierbei besteht darin, dass diese Zuleitungen durch die resonante Struktur verlegt werden müssen, ohne dass die Antenne in ihrer Hochfrequenzfunktion gestört wird. Daher muss jede einzelne Gleichstromzuleitung einzeln gedrosselt und entkoppelt werden, wobei spezielle, sehr aufwändig gefertigte Leitungen verwendet werden. Abgesehen von der Tatsache, dass die Platzverhältnisse im Inneren der resonanten Struktur beengt sind und nur schwer zugängliche Bauteile für die Drosselung und Entkoppelung aufnehmen können, ist dieser Aufbau aufgrund seines hohen Fertigungsaufwands sehr kostspielig.

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Magnetresonanzantenne mit einer Birdcage-Struktur zu schaffen, welche relativ einfach und kostengünstig aufgebaut ist und vorteilhafterweise durch Unterbrechung der Längsinduktivitäten verstimmt werden kann. Außerdem soll ein entsprechendes Verfahren zur Verstimmung der Eigenresonanzfrequenz einer solchen Antenne angegeben werden.

Diese Aufgabe wird durch eine Magnetresonanzantenne gemäß Patentanspruch 1 bzw. durch ein Verfahren gemäß Patentanspruch 19 gelöst.

Erfindungsgemäß sind hierbei die Hochfrequenz-Schaltelemente, welche sich in den einzelnen Antennen-Längsstäben befinden, an zumindest eine gemeinsame, von außerhalb der Birdcage-Struktur zu den Hochfrequenz-Schaltelementen geführte Schalt-
5 leitung angeschlossen. Die Hochfrequenz-Schaltelemente können somit über diese gemeinsame Schaltleitung geschaltet werden, so dass sich eine aufwändige und somit teure Verlegung einer Vielzahl von Gleichstromleitungen innerhalb der resonanten Struktur erübrigt. Zudem verringert sich der mögliche Ein-
10 fluss auf die Struktur durch die Gleichstromleitungen erheblich.

Die abhängigen Ansprüche enthalten besonders vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung.

15

Bei einem besonders bevorzugten Ausführungsbeispiel weist die Schaltleitung eine ringförmig an oder in der Birdcage-Struktur quer zu den Antennen-Längsstäben verlaufende Ringleitung auf, an welche die einzelnen Hochfrequenz-Schaltelemente an-
20 geschlossen sind. Da sich die Hochfrequenz-Schaltelemente in der Regel an der gleichen axialen Position zwischen den Endringen in den Antennen-Längsstäben befinden, verläuft die Ringleitung vorzugsweise genau senkrecht zu den Antennen-Längsstäben, d. h. die Ringleitung läuft in einer parallel zu
25 den Stirnflächen der Birdcage-Struktur verlaufenden Ebene um. Die Ringleitung ist bevorzugt an eine Zuleitung angeschlossen, die von einer Stirnseite der Birdcage-Struktur parallel zu den Antennen-Längsstäben verläuft. Die Schaltleitung besteht in diesem Fall aus der Ringleitung mit der daran ange-
30 schlossenen Zuleitung. Die Zuleitung verläuft dabei vorzugsweise genau senkrecht zu der Ringleitung.

Üblicherweise ist es erforderlich, an die Hochfrequenz-Schaltelemente zwei Schaltleitungen, eine Hinleitung und eine
35 Rückleitung, anzuschließen, beispielsweise bei Verwendung von Hochfrequenzschaltdioden eine anodenseitige Ringleitung und eine kathodenseitige Ringleitung. Bevorzugt sind diese Ring-

leitungen dann an der gleichen axialen Position zwischen den Antennen-Endringen, coaxial zueinander auf unterschiedlichen Radien, an und/oder in der Birdcage-Struktur umlaufend angeordnet. Wird zusätzlich darauf geachtet, dass die von außen
5 kommenden Zuleitungen der Ringleitungen jeweils senkrecht zu der betreffenden Ringleitung und parallel nebeneinander verlaufen, wird durch diese konsequente symmetrische Auslegung der Stromzufuhr zu den Hochfrequenz-Schaltelementen sichergestellt, dass hiervon grundsätzlich kein Magnetfeld ausgeht.

10

Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel ist eine solche Ringleitung vorzugsweise an einer Stelle galvanisch unterbrochen, wobei es sich anbietet, zur galvanischen Unterbrechung der Ringleitung ein kapazitives Element zu verwenden, so dass
15 die Ringleitung aus hochfrequenzmäßiger Sicht geschlossen ist. Eine derartige galvanische Unterbrechung der Ringleitung hat den Vorteil, dass Wirbelströme innerhalb der Ringleitung vermieden werden. Solche Wirbelströme könnten bei einem Schalten einer in der Magnetresonanzanlage angeordneten Gradientenspule in der Ringleitung induziert werden und zur Erwärmung der Ringleitung führen. Die Verwendung von kapazitiven Elementen zur galvanischen Unterbrechung der Ringleitung hat den Vorteil, dass die Ringleitungen hochfrequenzmäßig geschlossen sind und somit Asymmetrien im Aufbau der Antennenstruktur vermieden werden.
25

20

25

Darüber hinaus können aber auch noch weitere reaktive Bauteile wie Kapazitäten und/oder induktive Elemente in die betreffende Ringleitung eingebracht werden, um die Resonanzlänge
30 der Ringleitung passend einzustellen, so dass die Eigenresonanz der Ringleitung nicht im Arbeitsfrequenzbereich der Magnetresonanzanlage liegt.

30

35

Als Hochfrequenz-Schaltelemente können, wie bereits beschrieben, vorzugsweise Hochfrequenz-Schaltdioden, z. B. PIN-Dioden eingesetzt werden. Prinzipiell können aber auch andere Schaltelemente verwendet werden wie Relais, Transistoren oder

elektrostatisch geschaltete Elemente, sofern diese zum einen schnell genug geschaltet werden können und zum anderen hohe Hochfrequenz-Leistungen verarbeiten können.

- 5 Um eine möglichst gute Symmetrie zu erreichen, sind die Hochfrequenz-Schaltelemente vorzugsweise jeweils nahe oder unmittelbar in der geometrischen Mitte der Antennen-Längsstäbe zwischen den Endringen angeordnet.
- 10 Der Anschluss der Hochfrequenz-Schaltelemente an die Schaltungen bzw. deren Ringleitungen hängt u. a. davon ab, um welche Art von Hochfrequenz-Schaltelementen es sich handelt.

- Bei Verwendung von üblichen Schaltdioden, beispielsweise PIN-Dioden, erfolgt eine Schaltung über die Anschlüsse der Diode an die Antennen-Längsstäbe. So ist z. B. eine PIN-Diode anoden- und kathodenseitig an die Antennen-Längsstäbe angeschlossen und wird gleichzeitig durch die Anlegung einer Gleichspannung an den anodenseitigen Eingang und den kathodenseitigen Eingang geschaltet. Das heißt, die Hochfrequenz-Schaltelemente sind in diesen Fällen jeweils mit einem mit dem betreffenden Antennen-Längsstab verbundenen Anschluss an die Ringleitung angeschlossen.
- 15
- 20

- 25 Hierbei werden zwangsläufig durch die betreffende Ringleitung auch die Antennen-Längsstäbe untereinander verbunden. Um eine Störung der Hochfrequenzantennenstruktur durch die jeweilige Ringleitung zu vermeiden, gibt es verschiedene Möglichkeiten.

- 30 Eine Möglichkeit besteht darin, dass zumindest eine der Ringleitungen an die betreffenden Antennen-Längsstäbe jeweils im Bereich ihrer geometrischen Mitten, idealerweise exakt in der geometrischen Mitte, zwischen den Endringen angeschlossen ist. Da die geometrischen Mitten der Längsstäbe einer Birdcage-Antenne aus hochfrequenzmäßiger Sicht eine Äquipotentiallinie darstellen, d. h. das elektrische Potential der Mitten der Längsstäbe für alle Stäbe gleich ist, können die Mitten
- 35

der Längsstäbe elektrisch miteinander verbunden werden, ohne die Funktionalität der Magnetresonanzantenne zu beeinflussen.

Zusätzlich oder alternativ können die Hochfrequenz-Schalt-
5 elemente bzw. die Antennen-Längsstäbe auch jeweils über ein induktives Element an die betreffende Ringleitung angeschlossen sein. Als induktive Elemente bieten sich beispielsweise einfache Drosselspulen an. Ebenso können aber beispielsweise auch aus Drosselspulen und Kapazitäten gebildete Parallel-
10 Schwingkreise genutzt werden, wobei in diesem Fall die Drosselspulen nur eine geringere Anzahl von Wicklungen aufweisen müssen. Vorzugsweise können auch Drosselspulen verwendet werden, die genau bei der Magnetresonanz-Arbeitsfrequenz in Resonanz sind. Entscheidend ist, dass die induktiven Elemente
15 als Tiefpass-Elemente oder Bandsperren im Bereich der Arbeitsfrequenz des Birdcage-Resonators wirken und somit keine im Bereich der Arbeitsfrequenz wirksame hochfrequenzmäßige Verkopplung zwischen den Ringleitungen und den Antennen-Längsstäben besteht.

20 Eine Verbindung der Hochfrequenz-Schaltelemente mit der jeweiligen Ringleitung über Drosseln oder andere induktive Elemente hat außerdem den Vorteil, dass diese induktiven Elemente auch als Vorwiderstände dienen, die für einen Ausgleich
25 der Diodenströme sorgen, sofern nicht alle Hochfrequenz-Schaltelemente die exakt gleichen Parameter aufweisen. Alternativ könnte grundsätzlich eine Ankopplung der Hochfrequenz-Schaltelemente an die Schaltleitungen auch über andere als ohmsche Widerstände wirkende Bauelemente zum Ausgleich der
30 Diodenströme erfolgen.

Bei der Verwendung von Drosselspulen zur Hochfrequenzentkopplung der Ringleitungen von den Antennen-Längsstäben bzw. den Hochfrequenz-Schaltelementen ist zu berücksichtigen, dass
35 stromdurchflossene Spulen ein eigenes statisches Magnetfeld erzeugen. Um zu verhindern, dass das Magnetfeld der Drosselspulen das statische magnetresonanzrelevante B_0 -Feld überla-

gert, ist es vorteilhaft, eine solche Überlagerung durch geeignete Maßnahmen zu minimieren. Hierzu können die einzelnen Spulen geometrisch an der Birdcage-Struktur so angeordnet werden, dass das von ihnen erzeugte Magnetfeld senkrecht zur
5 Richtung des B_0 -Felds steht. Alternativ oder zusätzlich werden die Drosselspulen vorzugsweise paarweise antiparallel angeordnet, so dass sich die Magnetfeldkomponenten der einzelnen Drosselspulen durch vektorielle Überlagerung weitgehend gegenseitig auslöschen.

10

Um außerdem zu vermeiden, dass über die Schaltleitung von außen Hochfrequenzstörungen in die Birdcage-Struktur eingebracht werden, sind die Schaltleitungen eingangsseitig vorzugsweise mit einem geeigneten Tiefpass-Filter versehen.

15

Eine solche erfindungsgemäße Magnetresonanzantenne kann prinzipiell in jedem beliebigen Magnetresonanzgerät verwendet werden. Die Erfindung ist im Übrigen unabhängig von der Größe der Antenne, d. h. sie kann sowohl bei großen Ganzkörperantennen als auch bei kleineren Oberflächenantennen eingesetzt
20 werden, sofern diese nach einer Birdcage-Struktur aufgebaut sind.

20

Die Erfindung wird im Folgenden unter Hinweis auf die beigefügten Figuren anhand von Ausführungsbeispielen noch einmal näher erläutert. In den Figuren werden gleiche Bauteile mit denselben Bezugsziffern bezeichnet. Es zeigen:

25

FIG 1 eine perspektivische schematische Darstellung eines dreidimensionalen Drahtmodells einer erfindungsgemäßen Antenne mit einer Birdcage-Struktur mit acht Längsstäben,
30

FIG 2 eine Draufsicht auf eine Abwicklung eines Teils der Birdcage-Struktur gemäß FIG 1,

35

FIG 3 eine Draufsicht auf eine Abwicklung einer Birdcage-Struktur ähnlich wie in FIG 1, jedoch mit einer abge-

wandelten Ankopplung der Ringleitungen an die Birdcage-Struktur,

FIG 4 ein schematisches Schaltbild einer dritten Variante zur Beschaltung einer PIN-Diode innerhalb eines Längsstabs der Birdcage-Struktur,

FIG 5 ein schematisches Schaltbild für eine vierte Variante zur Beschaltung von HF-Schaltelementen innerhalb eines Längsstabs der Antennenstruktur,

FIG 6 ein schematisches Schaltbild einer fünften Variante zur Beschaltung von HF-Schaltelementen innerhalb eines Längsstabs der Birdcage-Struktur.

FIG 1 zeigt in Form eines einfachen dreidimensionalen Drahtmodells den typischen Aufbau einer Birdcage-Struktur. Eine solche Birdcage-Struktur besteht aus einer Anzahl von auf einer zylinderartigen Oberfläche angeordneten, äquidistanten, parallel laufenden Antennen-Längsstäben. Diese Längsstäbe sind endseitig jeweils durch Antennen-Endringe 3, 4 hochfrequenzmäßig untereinander verbunden. „Hochfrequenzmäßig verbunden“ heißt in diesem Zusammenhang, dass nicht zwingend eine galvanische Verbindung, sondern lediglich eine für Hochfrequenzströme transparente Verbindung bestehen muss. Wie in FIG 1 dargestellt - und wie dies üblicherweise bei Magnetresonanzantennen nach der Birdcage-Struktur der Fall ist - befinden sich in den Antennen-Endringen jeweils zwischen zwei Anschlussstellen benachbarter Antennen-Längsstäbe 2 Resonanzkondensatoren 5. Der besseren Übersichtlichkeit wegen sind hier sämtliche Strukturen nur von der Außenseite eines imaginären Zylinders, um welchen sich das Drahtmodell erstreckt, gezeigt.

In dem in FIG 1 dargestellten Ausführungsbeispiel sind die Endringe 3, 4 jeweils rund. Alternativ könnten die Endringe 3, 4 aber auch aus jeweils zwischen zwei Antennen-Längsstäben 2 verlaufenden, geraden Abschnitten bestehen. Die Antenne würde dann beispielsweise bei einem Ausführungsbeispiel mit 8 Längsstäben einen achteckigen Querschnitt aufweisen.

Eine solche Birdcage-Struktur kann grundsätzlich eine beliebige Anzahl von Längsstäben 2 aufweisen. So kann eine kleinere Antenne beispielsweise nur 6 Längsstäbe aufweisen. Bei einem derzeit entwickelten, in den Figuren der besseren Übersichtlichkeit wegen nicht dargestellten Ausführungsbeispiel weist die Birdcage-Struktur 16 Längsstäbe auf.

Die Magnetresonanzantenne 1 ist über Speiseleitungen 6 an einen Hochfrequenzpulsgenerator 7 angeschlossen. Die Speiseleitungen 6 sind dabei jeweils rechts und links neben einem Resonanzkondensator 5 an einem der Endringe 4 angeschlossen. Über diese Speiseleitung 6 erfolgt nicht nur die Einspeisung der Hochfrequenzpulse im Sendebetrieb, sondern auch der Abgriff der aufgefangenen Magnetresonanzsignale im Empfangsbetrieb.

Bei diesem Aufbau handelt es sich um eine linear polarisierte HF-Speisung, d. h. dass das von den Hochfrequenzpulsen erzeugte Hochfrequenzfeld (auch B_1 -Feld genannt) innerhalb der Magnetresonanzantenne 1 linear polarisiert ist. Die Erfindung ist aber unabhängig von der Einspeisung und kann bei beliebigen Polarisierungen des B_1 -Felds eingesetzt werden. So ist beispielsweise auch eine Speisung möglich, bei der eine Speiseleitung an einen Resonanzkondensator und eine weitere an ein Masseschild angeschlossen ist.

In der Nähe der geometrischen Mitte der Antennen-Längsstäbe 2 zwischen den Endringen 3, 4 befinden sich in den Antennen-Längsstäben 2 jeweils Hochfrequenz-Schaltelemente 8 in Form von PIN-Dioden 8. Durch geeignete Beschaltung dieser PIN-Dioden 8 können die Längsstäbe 2 zur Verstimmung der gesamten Birdcage-Magnetresonanzantenne 1 hochfrequenzmäßig unterbrochen werden.

Erfindungsgemäß sind hierbei die einzelnen PIN-Dioden 8 jeweils an gemeinsame Schaltleitungen 9, 10 angeschlossen, über die von außerhalb der Antennenstruktur die notwendige Gleich-

spannung bzw. der Gleichstrom an die PIN-Dioden 8 geführt wird.

Hierbei handelt es sich um zwei Schaltleitungen 9, 10, welche jeweils aus einer senkrecht zu den Antennen-Längsstäben 2 umlaufenden Ringleitung 11, 12 und einer an die betreffende Ringleitung 11, 12 angeschlossene, parallel zu den Antennen-Längsstäben 2 von einer Stirnseite der Birdcage-Struktur aus verlaufende Zuleitung 13, 14 bestehen. Eine der Ringleitungen 11 ist an die Kathodenseite, die andere Ringleitung 12 an die Anodenseite der PIN-Dioden 8 angeschlossen.

Die Ringleitungen 11, 12 sind jeweils an einer Stelle durch kapazitive Bauelemente 15, 16 galvanisch unterbrochen, wobei aber durch das kapazitive Bauelement 15, 16 die Leitungen hochfrequenzmäßig geschlossen sind. Dies hat einerseits den Vorteil, dass hochfrequenzmäßig eine vollkommene Symmetrie dieser Leitungen vorliegt, so dass hierdurch keine Beeinflussung der Hochfrequenzstruktur der Magnetresonanzantenne erfolgt. Andererseits wird aber eine Erzeugung von Wirbelströmen in den Ringleitungen 11, 12 bei einer Schaltung von Gradientenspulen der Magnetresonanzanlage vermieden.

Zur weiteren Erläuterung der Ankopplung der PIN-Dioden 8 an die Ringleitungen 11, 12 wird auf FIG 2 verwiesen, in der ein Ausschnitt aus dem dreidimensionalen Drahtmodell in Form einer Abwicklung dargestellt ist. Die Enden A-A', B-B', C-C', D-D' der Endringe 3, 4 bzw. der Ringleitungen 11, 12 sind hierbei jeweils unter Zwischenschaltung entsprechender Antennen-Längsstäbe 2 und in den Endringen 3, 4 angeordneter Resonanzkondensatoren 5 untereinander verbunden.

Wie aus den Figuren 1 und 2 zu ersehen ist, verbindet die kathodenseitige Ringleitung 11 sämtliche Längsstäbe 2 galvanisch miteinander. Hierzu verläuft die kathodenseitige Ringleitung 11 genau in der geometrischen Mitte der Antennen-Längsstäbe 2 zwischen den beiden Endringen 3, 4 (FIG 1). Da

die geometrischen Mitten der Antennen-Längsstäbe 2 aus Hochfrequenzsicht eine Äquipotentiallinie darstellen, ist eine solche elektrische Verbindung untereinander möglich, ohne dass die Funktionalität der Magnetresonanzantenne 1 beeinflusst wird.

Die Verbindung der anderen Ringleitung 12 mit dem an der Anodenseite der PIN-Dioden 8 angeschlossenen Teil der Antennen-Längsstäbe 2 erfolgt über Drosselspulen 19, welche als Tiefpass wirken. D. h. es gibt keine hochfrequenzmäßige Verbindung zwischen den Antennen-Längsstäben 2 und der anodenseitigen Ringleitung 12 bzw. Zuleitung 10. Diese zweite, anodenseitige Ringleitung 12 befindet sich ebenfalls im Bereich der geometrischen Mitte der Längsstäbe 2, jedoch coaxial zur ersten kathodenseitigen Ringleitung 11 auf einem größeren Radius. Der besseren Anschaulichkeit wegen sind in FIG 2 beide Ringleitungen 11, 12 jeweils leicht versetzt zur geometrischen Mitte M eingezeichnet. Die tatsächliche geometrische Anordnung ist dagegen besser in FIG 1 erkennbar.

Die Drosselspulen 19 erfüllen hier eine doppelte Funktion. Zum einen stellen sie eine hochfrequenzmäßige Isolation dar, zum anderen bilden sie Vorwiderstände, die die Aufteilung der Gleichströme auf die einzelnen PIN-Dioden 8 homogenisiert.

Wie insbesondere aus FIG 2 gut zu sehen ist, sind alle PIN-Dioden 8 gleichstrommäßig parallel geschaltet, wobei die radial außen liegende Ringleitung 12 eine gemeinsame Anschluss-elektrode für die Anoden der PIN-Dioden 8 darstellt und die innere, die Antennen-Längsstäbe 2 untereinander verbindende Ringleitung 11 eine gemeinsame Anschlusselektrode für die Kathoden aller PIN-Dioden 8 bildet.

Wie bereits eingangs erwähnt, sind die Antennen-Längsstäbe 2 und die Endringe 3, 4 - anders als dies aus den schematischen Bildern erscheint - in der Regel nicht in Form von Drähten aufgebaut, sondern in Form von Leiterbahnen auf biegsamen

Leiterfolien, welche beispielsweise zu einer Zylinderform gebogen und entsprechend zur Bildung vollständiger Ringe endseitig verbunden werden. Bei Verwendung von Multilayer-Leiterbahnfolien ist es grundsätzlich möglich, die Ringleitungen 11, 12 ebenfalls in Form von Leiterbahnen gemeinsam mit der Birdcage-Struktur in einer Multilayer-Leiterbahnfolie zu realisieren.

Die Zufuhr des zum Schalten der PIN-Dioden 8 notwendigen Gleichstroms von außen zu den Ringleitungen 11, 12 erfolgt über an die Ringleitung 11, 12 angeschlossene, parallel zu den Antennen-Längsstäben 2 verlaufende Zuleitungen 13, 14. Bei einem Ausführungsbeispiel werden diese Zuleitungen 13, 14 durch zwei parallel verlaufende, gegeneinander isolierte, verklebte GFK-Platinen mit einer Kupferkaschierung realisiert. Aus dem gleichen Material können im Übrigen aber auch die Ringleitungen 11, 12 aufgebaut sein. Die Stromzufuhrplatinen verlaufen, wie bei den Zuleitungen 13, 14 in den Figuren 1, 2 dargestellt, senkrecht zu den daran angeschlossenen Ringleitungen 11, 12. Durch diese konsequente symmetrische Auslegung der Stromzufuhr wird sichergestellt, dass von den Zuleitungen 13, 14 und den Ringleitungen 11, 12 kein Magnetfeld ausgeht, weil sich die durch die Stromzufuhr entstehenden Magnetfelder gegenseitig kompensieren.

Die Stromzufuhr über die Schaltleitungen 9, 10 erfolgt über einen Tiefpassfilter 17, an dessen Schalt-Eingänge 18 die benötigte Gleichspannung zum Schalten der PIN-Dioden 8 angelegt wird.

FIG 3 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel für eine Beschaltung der PIN-Dioden 8 in den Antennen-Längsstäben 2 einer Antenne 1 gemäß FIG 1 und 2, wobei jedoch hier sowohl die anodenseitige Ringleitung 12 als auch die kathodenseitige Ringleitung 11 jeweils über Drosselspulen 19, 20 mit den Antennen-Längsstäben 2 und somit mit den PIN-Dioden 8 verbunden sind.

Bei diesem Ausführungsbeispiel gibt es folglich keinerlei hochfrequenzmäßige Verbindung der Ringleitungen 11, 12 mit der Resonatorstruktur, so dass ein hochfrequenzmäßiger Einfluss der Ringleitungen 11, 12 auf die Parameter der Birdcage-Magnetresonanzantenne 1 vollkommen ausgeschlossen werden kann. Bei einer solchen beiderseitigen Kopplung der PIN-Dioden 8 über die Drosselspulen 19, 20 werden außerdem die Symmetriebedingungen beibehalten. Ein solcher Aufbau ist zwar etwas aufwändiger als der Aufbau gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel nach den Figuren 1 und 2. Der Aufbau ist aber besonders für Anwendungen geeignet, bei denen die Magnetresonanzantenne für einen breiten Frequenzbereich sicher transparent sein muss, beispielsweise weil die Magnetresonanzsignale von anderen Spulen gesendet werden, die in völlig anderen Frequenzbereichen arbeiten oder die bei sogenannten „X-Kernspektroskopie-Anwendungen“ über einen breiten Frequenzbereich verstellt werden.

Die stromdurchflossenen Drosselspulen 19, 20 erzeugen ein eigenes statisches Magnetfeld. Um einen Einfluss dieses Magnetfelds auf die Magnetresonanzantenne 1 zu minimieren, werden die Drosselspulen vorzugsweise paarweise antiparallel angeordnet, wie dies u. a. bei dem Ausführungsbeispiel gemäß FIG 3 der Fall ist. Die Magnetfeldkomponenten der einzelnen Drosselspulen 19, 20 löschen sich dann durch vektorielle Überlagerung gegenseitig weitgehend aus.

Dieses Verfahren ist grundsätzlich auch möglich, wenn die PIN-Dioden 8 nur einseitig - beispielsweise wie in FIG 2 nur anodenseitig - über Drosselspulen mit der Ringleitung 12 verbunden sind. Ein Ausführungsbeispiel hierzu ist in FIG 4 ausschnittsweise für eine einzelne PIN-Diode 8 dargestellt.

Die PIN-Diode 8 ist hierbei jeweils nicht über eine einzelne Spule 19 - wie bei den Ausführungsbeispielen gemäß den Figuren 1 und 2 - an die anodenseitige Ringleitung 12 angeschlossen, sondern über zwei parallel geschaltete Drosselspulen

19a, 19b, welche geometrisch antiparallel angeordnet sind. Zusätzlich sind hier die Spulen 19a, 19b geometrisch so angeordnet, dass das in ihnen durch einen durchfließenden Strom induzierte Magnetfeld B_{19a} , B_{19b} jeweils senkrecht zum B_0 -Feld ist, welches parallel zu den Antennen-Längsstäben 2 verläuft. Durch diese Maßnahmen wird die Überlagerung des magnetresonanzrelevanten B_0 -Felds durch das Magnetfeld B_{19a} , B_{19b} der Drosselspulen 19a, 19b so weit wie möglich minimiert.

- 10 Die Figuren 5 und 6 zeigen alternative Beschaltungsbeispiele für Konfigurationen mit reziproker Feldkompensation der Drosselspulen und zum B_0 -Feld orthogonaler Feldrichtung.

In FIG 5 sind anstelle einer PIN-Diode 8 zwei parallele PIN-Dioden 8a, 8b in den Antennen-Längsstab 2 geschaltet. Über anodenseitig den PIN-Dioden 8a, 8b vorgeschaltete Gleichstrom-Trennkondensatoren 21 erfolgt eine galvanische Trennung der anodenseitigen Anschlüsse der PIN-Dioden 8a, 8b. Diese Gleichstrom-Trennkondensatoren 21 sind hochfrequenzmäßig transparent, d. h. sie haben keinen Einfluss auf die Hochfrequenzstruktur der Birdcage-Magnetresonanzantenne 1. Alternativ würde auch ein Gleichstrom-Trennkondensator 21 ausreichen. Zwischen den Gleichstrom-Trennkondensatoren 21 und den anodenseitigen Anschlüssen der PIN-Dioden 8a, 8b sind wiederum Drosselspulen 19a, 19b angeschlossen, um die anodenseitigen Anschlüsse der PIN-Dioden 8a, 8b mit der betreffenden Ringleitung 12 zu verbinden.

FIG 6 zeigt eine Erweiterung des Ausführungsbeispiels gemäß FIG 5 in der Weise, dass hierbei keinerlei hochfrequenzmäßige Verbindungen zwischen den Ringleitungen 11, 12 und dem Antennen-Längsstab 2 mehr vorhanden sind. Analog zu der Anodenseite sind die PIN-Dioden 8a, 8b hier auch kathodenseitig jeweils über Drosselspulen 20a, 20b an eine Ringleitung 11 angeschlossen. Hierbei sind die einzelnen Drosselspulen 19a, 19b, 20a, 20b jeweils über Kreuz in paralleler Richtung angeordnet, so dass eine maximale Kompensation zwischen den Mag-

netfeldern B_{19a} , B_{19b} , B_{20a} , B_{20b} ermöglicht wird. Auch hier erfolgt wieder eine gleichstrommäßige Trennung der kathodenseitigen und anodenseitigen Anschlüsse der beiden hochfrequenzmäßig in dem Antennen-Längsstab 2 geschalteten PIN-Dioden 8a, 8b über Gleichstrom-Trennkondensatoren 21, 22, welche für hochfrequente Ströme transparent sind und daher die Birdcage-Struktur nicht beeinflussen. Aus Symmetriegründen sind hier vier Gleichstrom-Trennkondensatoren 21, 22 vorgesehen. Grundsätzlich ist es aber nicht notwendig, alle vier Trennkondensatoren 21, 22 einzubauen.

Die Erfindung bietet eine in ihrer Funktion äußerst wirksame und in der Herstellung kosteneffiziente Lösung der Verstimmproblematik einer in einer Birdcage-Struktur aufgebauten Magnetresonanzantenne bei höheren Magnetfeldstärken. Die Führung der für die Verstimmung notwendigen Gleichstromsignale durch die hochfrequenzaktive Region der Birdcage-Struktur findet ohne eine Störung der Hochfrequenzfunktionalität statt. Durch die konsequente symmetrische Führung der stromführenden Komponenten zur Verstimmvorrichtung und vorzugsweise durch eine antiparallele Anordnung der Drosselspulen wird sichergestellt, dass keine Überlagerung der Hauptmagnetfeldkomponenten auftritt. Ein Hauptvorteil gegenüber einer Verstimmvorrichtung an den Antennen-Endringen der Birdcage-Struktur besteht in der höheren Verstimmwirkung. Der Vorteil im Vergleich zu einer Verstimmung der Antennen-Längsstäbe mit separater Stromzufuhr für die einzelnen Hochfrequenz-Schaltelemente besteht in einem erheblich einfacheren, kostengünstigeren Aufbau und der zusätzlich zum Aufbau genutzten Möglichkeit der Kompensation der Magnetfelder der einzelnen Drosselspulen.

Es wird noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich bei den in den Figuren dargestellten Aufbauten lediglich um Ausführungsbeispiele handelt. So sind in einem weiten Umfang beliebige Variationen der Ausführungsbeispiele möglich, ohne den Rahmen der Erfindung zu verlassen. Insbesondere ist es nicht

notwendig, dass jeder der Antennen-Längsstäbe mit einem Hochfrequenzschaltelement versehen ist. So reicht es z. B. zur Verstimmung einer Birdcage-Struktur innerhalb einer Magnetresonanzanlage, die nur für eine „normale“ Protonenbildgebung verwendet wird, aus, wenn durch Unterbrechung einzelner Längsstäbe das Gitter der Birdcage-Struktur großmaschiger gemacht wird. Auf diese Weise kann eine hinreichende Verstimmung gegenüber der Protonenresonanzfrequenz erreicht werden. Eine Unterbrechung nur eines Teils der Antennen-Längsstäbe ist wegen des damit verbundenen geringeren Aufwands beim Aufbau der Struktur kostengünstiger. Eine Unterbrechung sämtlicher Antennen-Längsstäbe hat dagegen Vorteile, wenn eine solche Magnetresonanzantenne auch in X-Kernspektroskopie-Anwendungen verwendet werden soll, da durch die Unterbrechung sämtlicher Antennen-Längsstäbe und somit der gesamten Gitterstruktur gewährleistet ist, dass die Antenne über einen sehr großen HF-Bereich transparent ist.

Obwohl die Erfindung überwiegend am Beispiel von Magnetresonanzanlagen im medizinischen Bereich beschrieben wurde, sind die Einsatzmöglichkeiten der Erfindung nicht auf diesen Bereich beschränkt, sondern die Erfindung kann ebenso auch in wissenschaftlichen und/oder industriellen Anlagen genutzt werden.

Patentansprüche

1. Magnetresonanzantenne (1), welche in einer Birdcage-Struktur angeordnete, parallel verlaufende Antennen-Längsstäbe (2) und die Antennen-Längsstäbe (2) endseitig hochfrequenzmäßig verbindende Antennen-Endringe (3) aufweist, mit einer Mehrzahl von Hochfrequenz-Schaltelementen (8, 8a, 8b), um zumindest einen Teil der Antennen-Längsstäbe (2) zur Verstimmung der Eigenresonanzfrequenz der Antenne (1) gegenüber einer Arbeits-Magnetresonanzfrequenz hochfrequenzmäßig zu unterbrechen,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die Hochfrequenz-Schaltelemente (8, 8a, 8b) an zumindest eine gemeinsame, von außerhalb der Birdcage-Struktur zu den Hochfrequenz-Schaltelementen (8, 8a, 8b) geführte Schaltung (9, 10) angeschlossen sind.
2. Magnetresonanzantenne nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Schaltung (9, 10) eine ringförmig an oder in der Birdcage-Struktur quer zu den Antennen-Längsstäben (2) verlaufende Ringleitung (11, 12) aufweist, an welche die einzelnen Hochfrequenz-Schaltelemente (8, 8a, 8b) angeschlossen sind.
3. Magnetresonanzantenne nach Anspruch 2, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die Ringleitung (11, 12) an einer Stelle galvanisch unterbrochen ist.
4. Magnetresonanzantenne nach Anspruch 3, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass in die Ringleitung (11, 12) zur galvanischen Unterbrechung ein kapazitives Element (15, 16) geschaltet ist.
5. Magnetresonanzantenne nach einem der Ansprüche 2 bis 4, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die Schaltung (9, 10) eine an die Ringleitung (11, 12) angeschlossene Zuleitung (13, 14) aufweist, die von einer Stirn-

seite der Birdcage-Struktur parallel zu den Antennen-Längsstäben (2) verläuft.

6. Magnetresonanzantenne nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
5 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die Hochfrequenz-Schaltelemente (8, 8a, 8b) jeweils nahe oder in der geometrischen Mitte (M) der Antennen-Längsstäbe (2) zwischen den Endringen (3, 4) angeordnet sind.

10 7. Magnetresonanzantenne nach einem der Ansprüche 1 bis 6,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die Hochfrequenz-Schaltelemente (8, 8a, 8b) jeweils mit einem mit dem betreffenden Antennen-Längsstab (2) verbundenen Anschluss an die Ringleitung (11, 12) angeschlossen sind.

15 8. Magnetresonanzantenne nach Anspruch 7,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass zumindest eine Ringleitung (11, 12) an die Antennen-Längsstäbe (2) im Bereich ihrer geometrischen Mitte (M) zwischen den Endringen
20 (3, 4) angeschlossen ist.

9. Magnetresonanzantenne nach einem der Ansprüche 1 bis 8,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die Hochfrequenz-Schaltelemente (8, 8a, 8b) jeweils über ein einen
25 ohmschen Widerstand bildendes Bauelement (19, 19a, 19b, 20, 20a, 20b) an die betreffende Ringleitung (11, 12) angeschlossen sind.

10. Magnetresonanzantenne nach Anspruch 9,
30 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, dass die Hochfrequenz-Schaltelemente (8, 8a, 8b) und/oder die Antennen-Längsstäbe (2) jeweils über zumindest ein induktives Element (19, 19a, 19b, 20, 20a, 20b) an die betreffende Ringleitung (11, 12) angeschlossen sind.

11. Magnetresonanzantenne nach Anspruch 10,
dadurch gekennzeichnet, dass die induktiven Elemente (19, 19a) Spulen (19b, 20, 20a, 20b) umfassen.

5

12. Magnetresonanzantenne nach Anspruch 11,
dadurch gekennzeichnet, dass die Spulen (19a, 19b, 20a, 20b) derart angeordnet sind, dass ein durch die jeweilige Spule (19a, 19b, 20a, 20b) im Betrieb erzeugtes Magnetfeld (B_{19a} , B_{19b} , B_{20a} , B_{20b}) senkrecht zur Feldrichtung eines Grundmagnetfelds (B_0) eines Magnetresonanzgeräts angeordnet ist, in welchem die Magnetresonanzantenne (1) betrieben wird.

10

13. Magnetresonanzantenne nach einem der Ansprüche 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Spulen (19a, 19b, 20a, 20b) paarweise antiparallel angeordnet sind.

15

14. Magnetresonanzantenne nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Hochfrequenz-Schaltelemente (8, 8a, 8b) an zwei Schaltleitungen (9, 10) angeschlossen sind, deren Ringleitung (11, 12) an gleicher axialer Position zwischen den Antennen-Endringen (3, 4) koaxial auf unterschiedlichen Radien um und/oder in der Birdcage-Struktur verlaufen.

20

25

15. Magnetresonanzantenne nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Hochfrequenz-Schaltelemente (8, 8a, 8b) Hochfrequenz-Schaltdioden (8, 8a, 8b) umfassen.

30

16. Magnetresonanzantenne nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Antennen-Längsstäbe (2) anodenseitig und kathodenseitig der Hochfrequenz-Schaltdioden (8, 8a, 8b) an jeweils eine Ringleitung (11, 12) angeschlossen sind.

35

17. Magnetresonanzantenne nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Schaltleitung (9, 10) eingangsseitig einen Tiefpassfilter (17) aufweist.

5

18. Magnetresonanzgerät mit einer Magnetresonanzantenne (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 17.

19. Verfahren zur Verstimmung der Eigenresonanzfrequenz einer Magnetresonanzantenne (1), mit in einer Birdcage-Struktur angeordneten, parallel verlaufenden Antennen-Längsstäben (2) und die Antennen-Längsstäbe (2) endseitig hochfrequenzmäßig verbindenden Antennen-Endringen (3, 4), bei dem mittels einer Mehrzahl von Hochfrequenz-Schaltelementen (8, 8a, 8b) zumindest ein Teil der Antennen-Längsstäbe (2) hochfrequenzmäßig unterbrochen wird, dadurch gekennzeichnet, dass die Hochfrequenz-Schaltelemente (8, 8a, 8b) über zumindest eine gemeinsame, von außerhalb der Birdcage-Struktur zu den Hochfrequenz-Schaltelementen (8, 8a, 8b) geführte Schaltleitung (9, 10) geschaltet werden.

10

15

20

20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Antennen-Längsstäbe (2) jeweils nahe oder in ihrer geometrischen Mitte (M) zwischen den Antennen-Endringen (3, 4) hochfrequenzmäßig unterbrochen werden.

25

Zusammenfassung

Magnetresonanzantenne

5 Es wird eine Magnetresonanzantenne (1) beschrieben, welche in
einer Birdcage-Struktur angeordnete, parallel verlaufende An-
tennen-Längsstäbe (2) und die Antennen-Längsstäbe (2) endsei-
tig hochfrequenzmäßig verbindende Antennen-Endringe (3) auf-
weist. Die Magnetresonanzantenne (1) besitzt außerdem eine
10 Mehrzahl von Hochfrequenz-Schaltelementen (8, 8a, 8b), um zur
Verstimmung der Eigenresonanzfrequenz der Antenne (1) gegen-
über einer Arbeits-Magnetresonanzfrequenz zumindest einen
Teil der Antennen-Längsstäbe (2) hochfrequenzmäßig zu unter-
brechen. Die Hochfrequenz-Schaltelemente (8, 8a, 8b) sind da-
15 bei an zumindest eine gemeinsame, von außerhalb der Birdcage-
Struktur zu den Hochfrequenz-Schaltelementen (8, 8a, 8b) ge-
führte Schaltleitung (9, 10) angeschlossen. Darüber hinaus
wird ein entsprechendes Verfahren zur Verstimmung einer Mag-
netresonanzantenne (1) beschrieben.

20

FIG 1

FIG 1

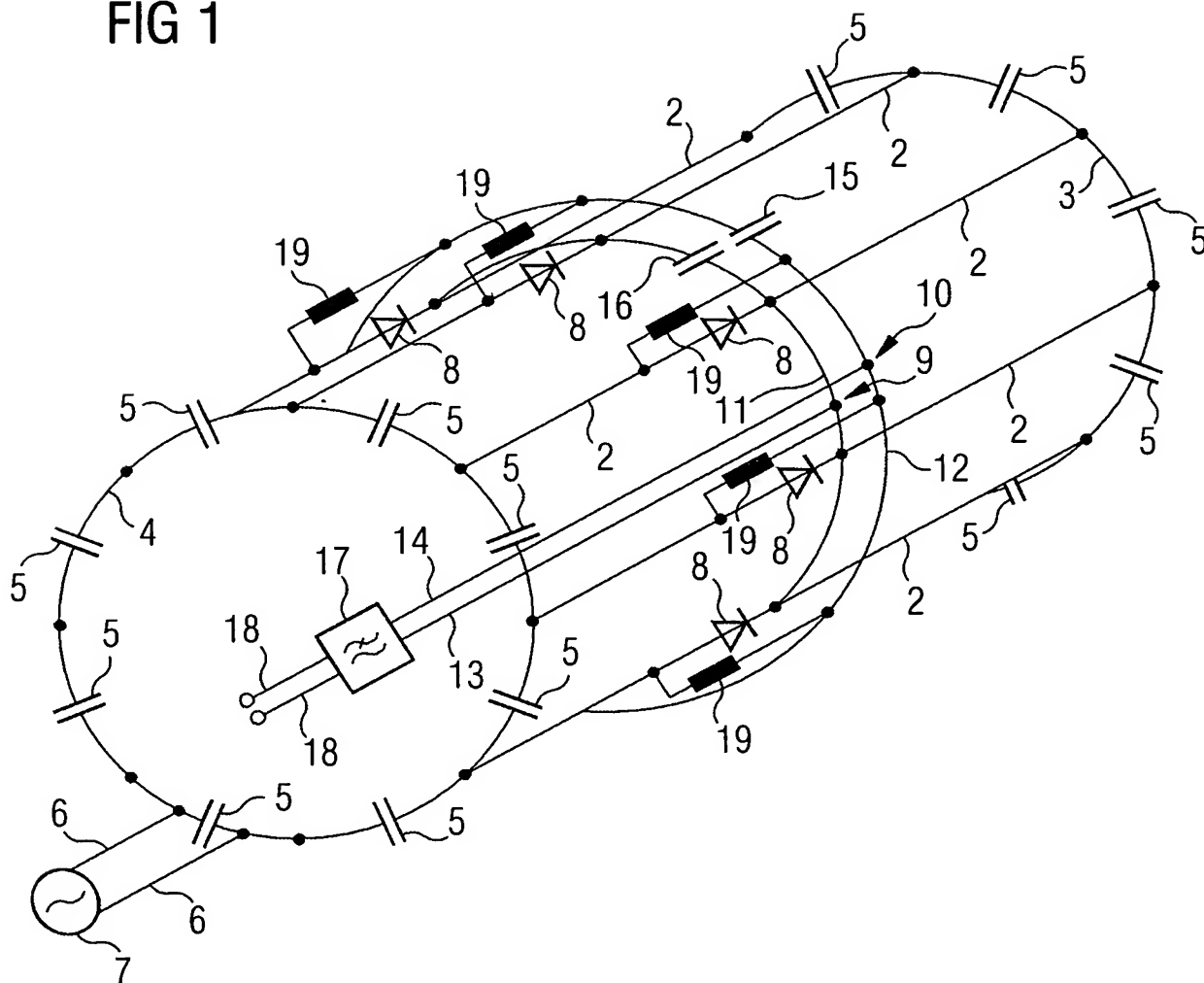


FIG 2

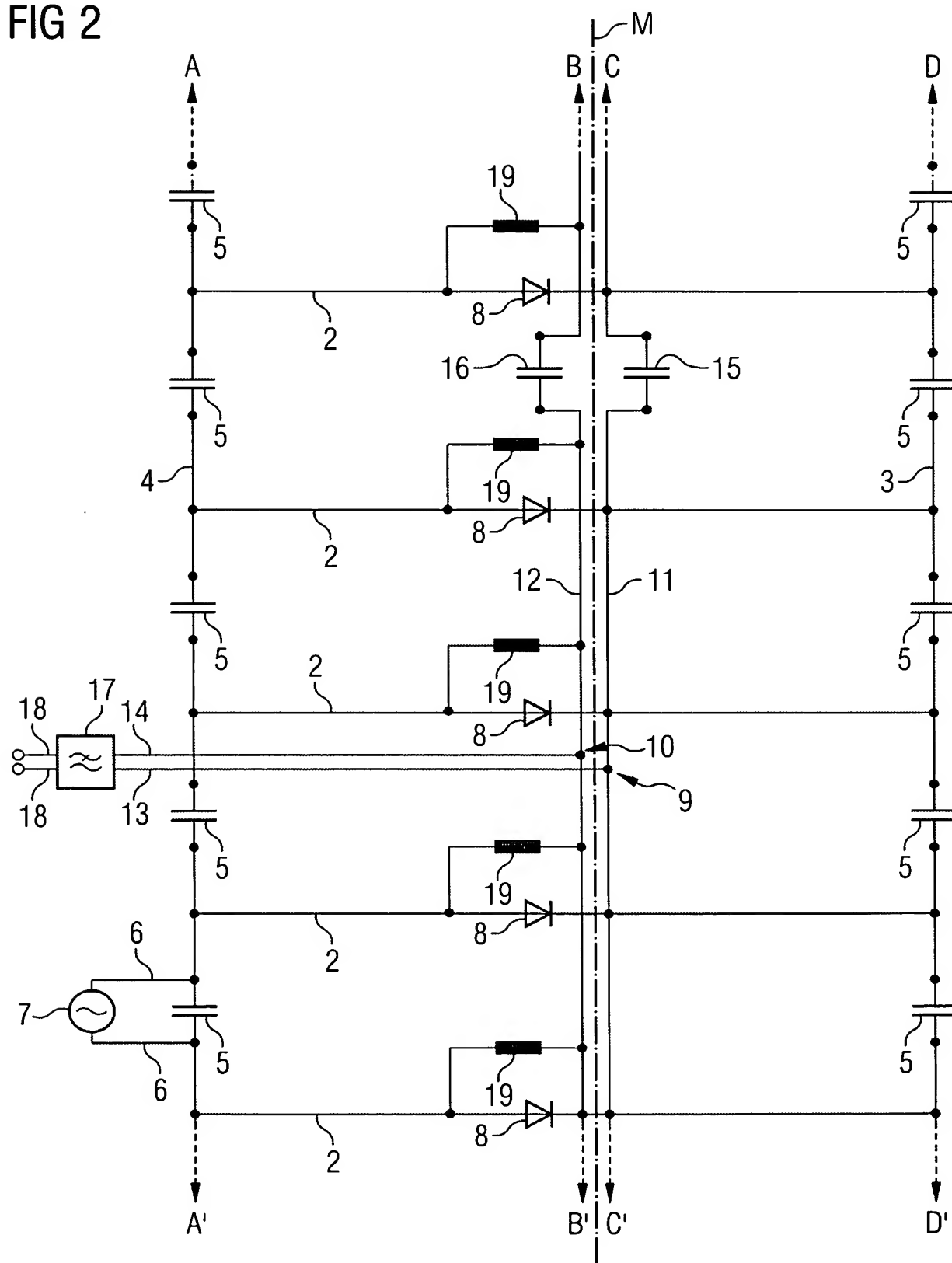


FIG 3

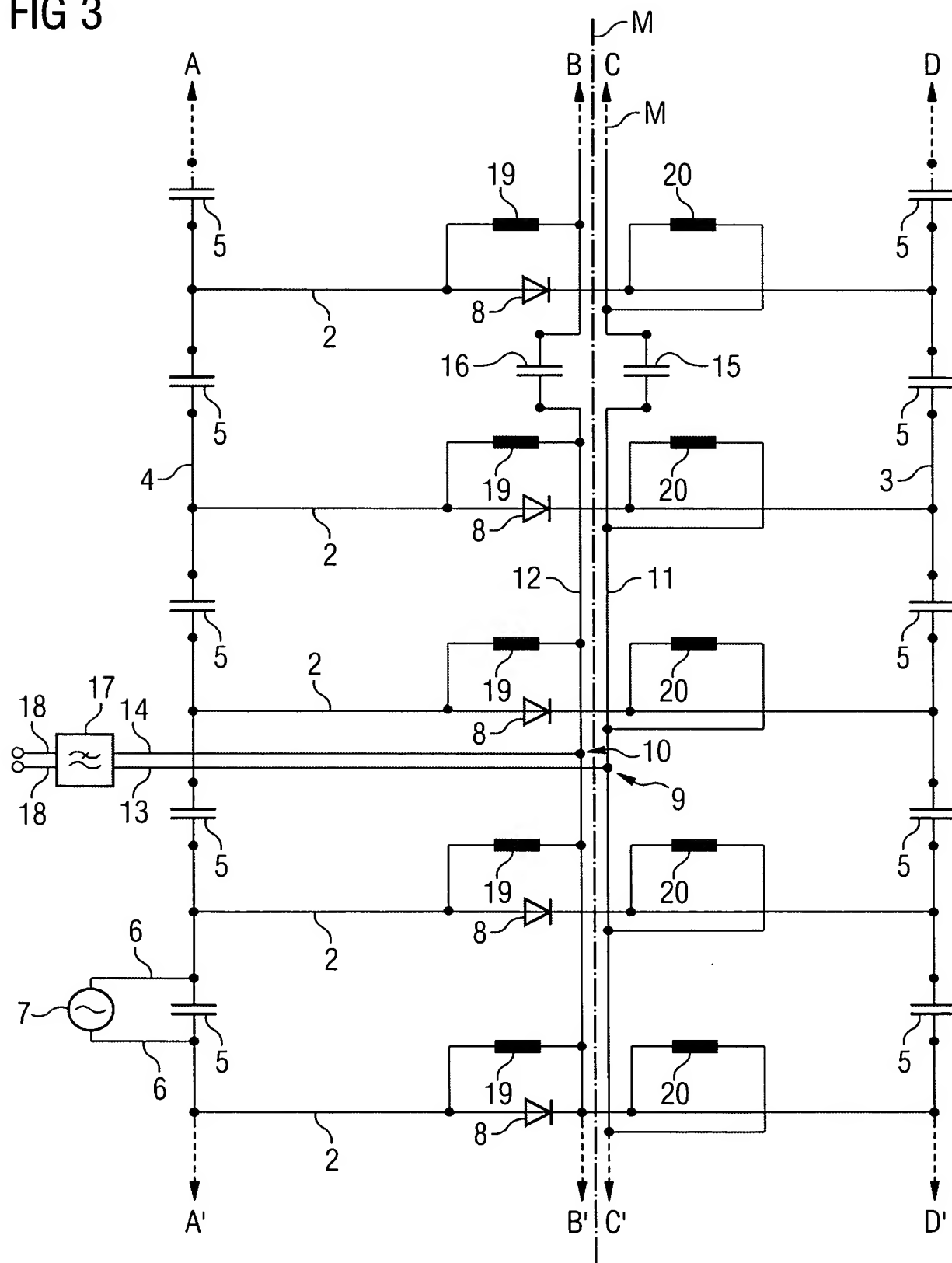


FIG 4

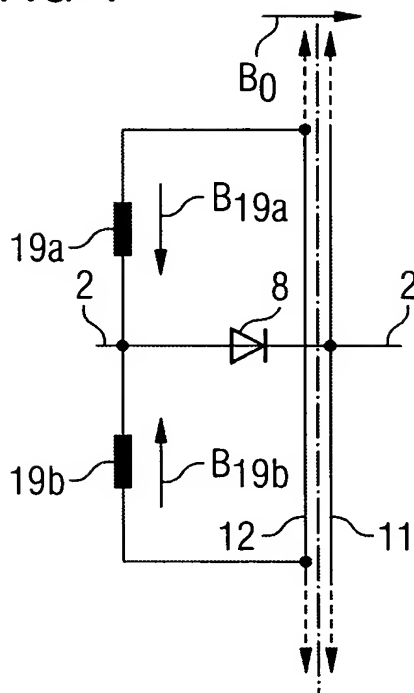


FIG 5

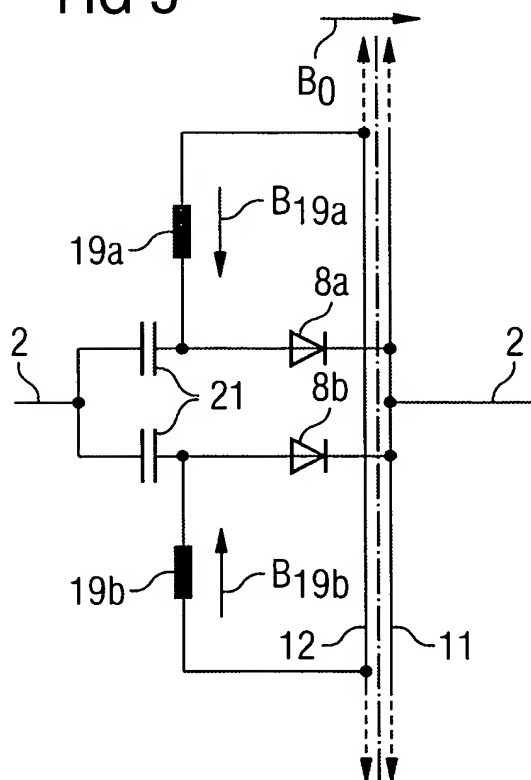


FIG 6

